

doi: 10.11720/wtyht.2022.1102

陈大磊,王润生,贺春艳,等.综合地球物理探测在深部空间结构中的应用——以胶东金矿集区为例[J].物探与化探,2022,46(1):70-77.
http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1102

Chen D L, Wang R S, He C Y, et al. Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures: A case study of Jiaodong gold ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 70-77. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1102

综合地球物理探测在深部空间结构中的应用 ——以胶东金矿集区为例

陈大磊^{1,2}, 王润生^{1,2}, 贺春艳^{1,2}, 王珣^{1,2}, 尹召凯³, 于嘉宾^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013; 3. 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 招远 265400)

摘要: 胶东地区作为我国主要的黄金产区,“攻深找盲”成为该区深部找矿重点研究方向。在“深部金矿资源评价理论、方法与预测”的工作基础之上,通过对莱州市金城镇—海阳市二十里店镇一带金矿集区开展高精度重力、高精度磁法、大地电磁测深综合物探剖面测量,综合前期已有成果对获取的重、磁、电资料进行综合研究分析,对区内太古宙至中生代侵入岩、前寒武纪变质基底、胶莱盆地地层的深部空间分布特征、相互关系及主要控矿构造的深部形态及特征进行了归纳总结,为后期深部金矿的找矿预测以及相关研究工作提供目标和依据。

关键词: 重、磁勘探; 大地电磁测深; 中生代侵入岩; 前寒武纪变质基底; 胶莱盆地

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0070-08

0 引言

胶东地区金矿成矿范围广、类型多样,但均表现为受断裂构造控制,不同规模和形式的断裂构造控制着不同类型金矿的产出^[1]。随着目前区内勘探和开采深度的增加以及成矿理论研究的逐步深入,需要对区内深部地质体、构造发育特征及其与金成矿的关系开展更加深层次的探讨。本次利用重、磁、电联合反演从多方向对同一地质目标体利用不同物性参数进行相应的研究,利用大地电磁测深丰富的频谱以及不受高阻地质体屏蔽影响等特点,对地下深部电性结构进行有效探测;通过重磁勘探横向分辨率较高这一优势,对所获得的深部电性结构剖面进行约束,建立地质—地球物理模型进行约束反演,将地质与地球物理勘探有机结合,提高解释的准确性及可靠性^[2-3]。

为研究该区深部岩浆活动—浅部伸展构造特征及区内中生代侵入岩与前寒武纪变质基底以及胶莱盆地地层之间的深部空间特征^[4],在该区完成了一条 NW 向 120 km 的重、磁、电剖面。该剖面北西起莱州市金城镇,东南至海阳市二十里店镇,与该区主要地质单元及构造走向垂直,为后期资料反演提供基础。应用重、磁、电综合物探技术进行点、线、面相结合,多参数约束反演、多信息综合研究,实现了重、磁、电资料的相互约束、相互补充和相互佐证,较为准确地揭示了深部构造特征及地层岩体的深部空间特征。

1 地质背景

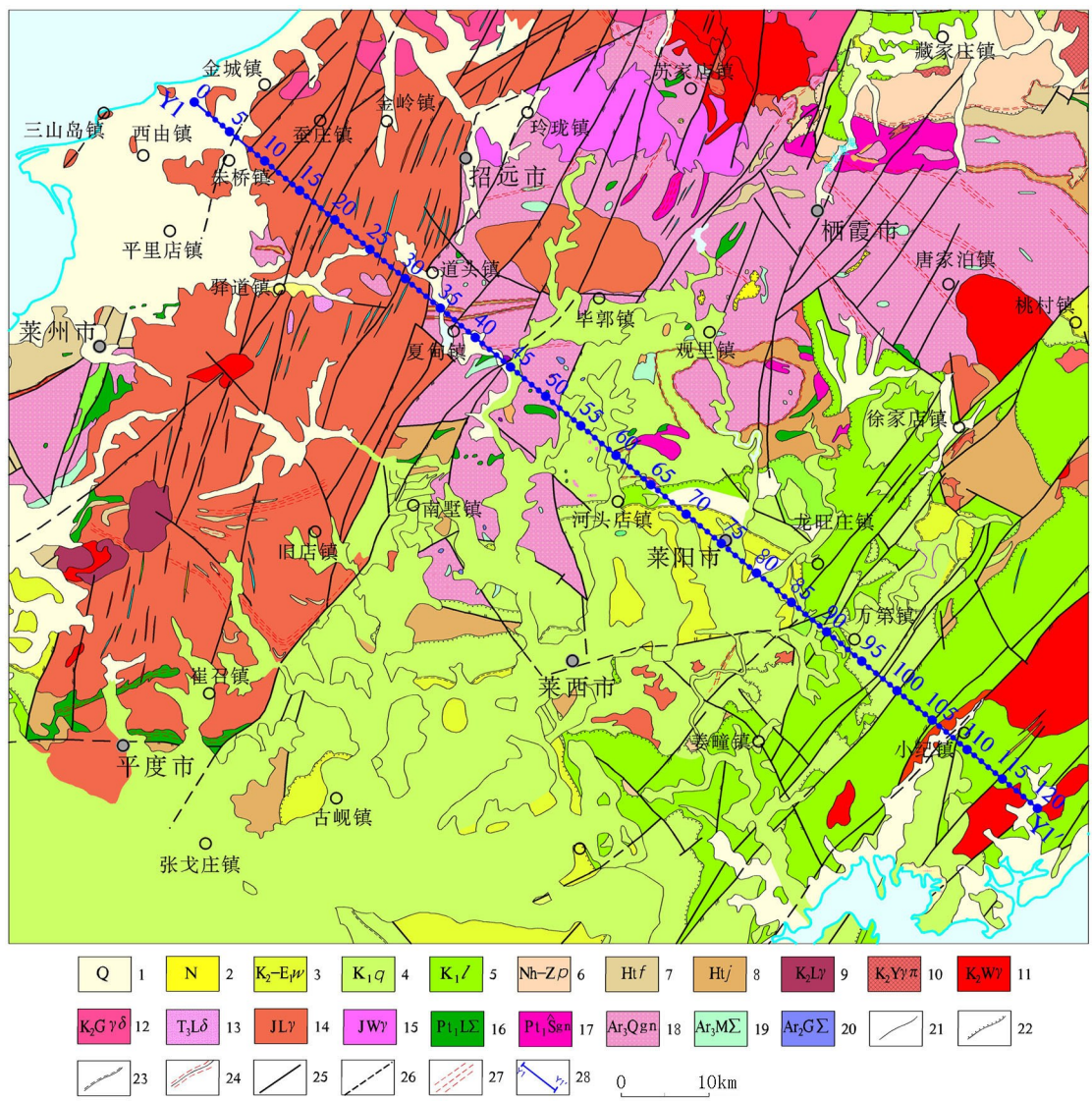
胶东地区位于华北陆块东南部和秦岭—大别—苏鲁造山带东北部,由胶北隆起、胶莱盆地和威海隆起 3 大构造单元组成(图 1)。主要分布前寒武纪和

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“胶东深部金矿断裂控矿机理”(U2006201); 2021 年度局控地质勘查与科技创新项目“胶东深部金矿断裂综合地球物理研究”(KY202112); 山东省重大科技创新工程项目“深部探测综合地球物理技术”(2018CXGC1601); 山东省地质矿产勘查开发局 2018 年度矿产勘查项目(KC2018009)

第一作者: 陈大磊(1988-),男,工程师,2012年毕业于长安大学,主要从事深部地球物理探测应用研究。Email: cdl2602080210@sina.com

通讯作者: 王润生(1987-),男,工程师,2010年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地质矿产勘查研究工作。Email: wrs674@126.com



1—第四系;2—新近系;3—白垩系王氏群;4—白垩系青山群;5—白垩系莱阳群;6—青白口系—震旦系蓬莱群;7—古元古界粉子山群;8—古元古界荆山群;9—白垩系崂山型花岗岩;10—白垩系雨山型花岗岩闪长斑岩;11—白垩系伟德山型花岗岩;12—白垩系郭家岭型花岗岩;13—三叠系柳林庄型闪长岩;14—侏罗系玲珑型花岗岩;15—侏罗系文登型花岗岩;16—古元古界莱州组合;17—古元古界双顶片麻岩套;18—新太古界栖霞片麻岩套;19—新太古界马连庄组合;20—中太古界官地洼组合;21—地质界线;22—角度不整合界线;23—平行不整合界线;24—韧性剪切接触界线;25—实测断层;26—推测断层;27—韧性剪切带;28—重、磁、电综合剖面位置

1—Quaternary alluvium;2—Neocene;3—the Cretaceous wang group;4—the Cretaceous qingshan group;5—the Cretaceous laiyang group;6—qing-baikou-Sinian penglai group;7—Paleoproterozoic fenzishan group;8—Paleoproterozoic jingshan group;9—Cretaceous laoshan type granite;10—the Cretaceous yushan type granodiorite porphyry;11—Cretaceous weide mountain type granite;12—Cretaceous guojialing type granite;13—Triassic lilunzhuang type diorite;14—Jurassic linglong type granite;15—Jurassic wendeng type granite;16—Paleoproterozoic laizhou assemblage;17—Paleoproterozoic double-topped gneiss suite;18—Neoproterozoic qixia gneiss suite;19—Neoproterozoic association of malianzhuang;20—the middle Archean guandiwa assemblage;21—geological boundary;22—angular unconformity boundary;23—parallel unconformity boundaries;24—ductile shear contact boundary;25—the measured fault;26—inferred fault;27—tough shear zone;28—the location of gravity, magnetism and electricity composite profile

图 1 研究区地质略图

Fig.1 Geological sketch of the study area

中生代地质体,少量古近系—新近系火山岩和碎屑沉积及第四系松散沉积。区内基底岩系属华北地层区,出露地层主要由前寒武系变质地层和中生界陆相沉积火山地层。

区内构造主要以断裂构造和褶皱构造为主,胶

东金矿集区主要控矿断裂自西向东:三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、栖霞断裂、牟乳断裂等;褶皱构造总体呈 EW 向舒缓反“S”型展布,北部为莱州、招远、栖霞、威海弧状复式背斜,南部为旧店、莱阳、乳山、荣成弧状复式褶皱^[5]。

本次综合剖面 Y1 自西向东穿过的地质单元依次为焦家断裂带西部的第四系覆盖区、焦家断裂带和招平断裂带之间的玲珑岩体分布区、夏甸至河头店之间的前寒武系变质基底分布区、莱阳盆地—伟德山岩体侵入区。

2 物性特征

地球物理勘探的前提和基础是基于岩(矿)石间的物性差异,其中密度、磁性和电性差异是引起重磁电异常的基础,更是物探成果综合研究、解释推断的重要依据。区内各主要地质单元在电阻率、密度上均有较为明显的差异,因此可以根据重力、MT 测

量进行地质单元划分和推断解释工作,通过磁法测量进行磁性体解释。

结合物性测试统计结果(表 1、表 2)对区内物性特征分析如下:区内中生代沉积盆地为低密度、低阻特征,一般为弱磁性或无磁性特征,其中青山群火山沉积盆地内会出现局部强磁异常;中生代侵入岩体为低密度、高阻、弱磁性特征,如局部有中—基性岩体侵入或有中—基性岩石包裹体时,可出现局部高磁异常;新太古界栖霞序列片麻岩套一般为中等密度、中阻、弱磁性特征,由于其中常有基性、超基性岩残留体发育,因此常出现局部高磁异常;古元古界荆山群为高密度、高阻特征,磁性变化大,该套地层为区内的高密度标志层电性表现为高阻特征^[6-7]。

表 1 区域地层物性参数统计

Table 1 Statistical table of regional stratigraphic physical parameters

地质年代	地层	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)		K/(10 ⁻⁶ 4πSI)		电阻率ρ/(Ω·m)	
		平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
中生代	王氏群	2.55	2.29~2.68	18.7	0~81.5	154	18.1~1104
	青山群	2.62	2.37~2.77	327	0.55~2064	16211	90.5~157500
	莱阳群	2.63	2.34~2.75	149	0~2853	3324	41.0~91800
		2.64	2.50~2.75	16.4	0.55~36.9	3137	128~17442
古元古代	粉子山群	2.75	2.62~2.88	61.3	34.1~187	2000	75~22186
	荆山群	2.78	2.48~3.30	168	0~3055	2515	84.0~24982

表 2 区域岩浆岩物性参数统计

Table 2 Statistical table of regional magmatic rock physical property parameters

地质年代	序列	岩(矿)石名称	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)		K/(10 ⁻⁶ 4πSI)		电阻率ρ/(Ω·m)	
			平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
中生代	伟德山	中粗粒二长花岗岩	2.60	2.47~2.74	578	3.7~1679	5022	2081~7963
		斑状中粒花岗闪长岩	2.65	2.50~2.74	231	3.26~2125	4289	369~21300
	郭家岭	花岗闪长岩	2.60	2.58~2.62	348	0~2188		
		中粒二长花岗岩	2.58	2.51~2.69	134	0~691	6730	545~38982
	玲珑	片麻状细粒二长花岗岩	2.61	2.54~2.64	191	0~1379	1500	140~9132
		黑云母花岗岩	2.57	2.48~2.60	233	23~493		
		弱片麻状细粒含石榴二长花岗岩	2.55	2.40~2.69	146	24.3~490		
古元古代	荣成	片麻岩套	2.62	2.52~2.70	380	162~600.49	1377	225~5080
新太古代	栖霞	中细粒含角闪黑云英云闪长质片麻岩	2.69	2.53~2.95	356	17.3~513	540	209~1324
		细粒含角闪黑云英云闪长质片麻岩	2.68	2.50~2.87	348	14.6~621	603	198~1131
		蚀变碎裂岩及矿石	2.62	2.51~2.9	7	0.50~21.0	1000	176~5230

3 重、磁、电综合地球物理勘探

3.1 重、磁、电勘探

本次综合剖面 Y1 的重磁测量工作点距为 200 m,重力测量使用 CG-5 型高精度流动石英弹簧重力仪,磁法测量采用 GSM-19T 型质子磁力仪,通过对重磁数据进行各项改正(固体潮改正、正常场校正、高度校正、地形校正、布格校正、日变改正、正常场改

正、高度改正、总基点改正等)得到布格重力值及磁异常值,最后利用 RGIS2016 软件对重磁数据进行位场转换^[8-10]。大地电磁测深点距 1 km,重点地段(重要成矿带)加密至 500 m。野外测量采用 V8 电法工作站,采用五分量张量观测方式,有效观测频率范围为 320~0.000 5 Hz,采集时间长度不少于 10 h。大地电磁法数据处理采用 Phoenix Geophysics 公司的 SSMT2000 软件进行时频转换,利用 MTeditor 软件对原始数据进行处理和定性分析,采用相邻地质

单元极化一致的原则进行极化方向的判别,采用 Geosystem 公司的 WingLink 软件进行“TM”模式带地形 NLCG 二维反演^[11-12]。

3.2 重、磁、电联合反演

在地质、物性、已有钻孔的资料的约束下,综合应用多种类型的数据信息,使重、磁、电数据模拟和主观解释达到最佳,得到各参数有机统一的地质—地球物理模型,从而对地下地质情况作出客观、合理、可靠的综合推断解释^[13-16]。联合反演思路(图 2)如下:

1) 将取得的 MT 数据进行带地形 NLCG 二维反演,求得其电性反演结果,以视电阻率等值线密集的垂向高低阻过渡带和相位低值异常的垂向错位确定断裂分布及特征,结合地质认识,建立联合反演的初始地质模型。

2) 根据地层和岩石的密度磁性资料输入其物性参数,利用 RGIS2016 软件进行 2.5D 重磁正反演,对建立的初始地质—地球物理模型进行正演计算、反演拟合理论重、磁异常。通过不断修改初始模型和物性参数,使正演计算的理论重、磁曲线与实测的曲线拟合到最佳。

3) 将重、磁联合反演结果与 MT 法 NLCG 二维反演结果进行分析对比,对 MT 数据进行精细处理并修改电性层模型和反演参数,重新进行更为精细的二维反演解释。联合反演过程中,进行模型修改时要注重分析模型对应的实际地质含义,使得模型的调整更加符合实地地质概况。

4) 重复上述 3 步,使地质—地球物理模型与重、磁、电实测资料达到拟合有机统一,逐渐逼近客观地质事实,确定最终的地质解释成果。

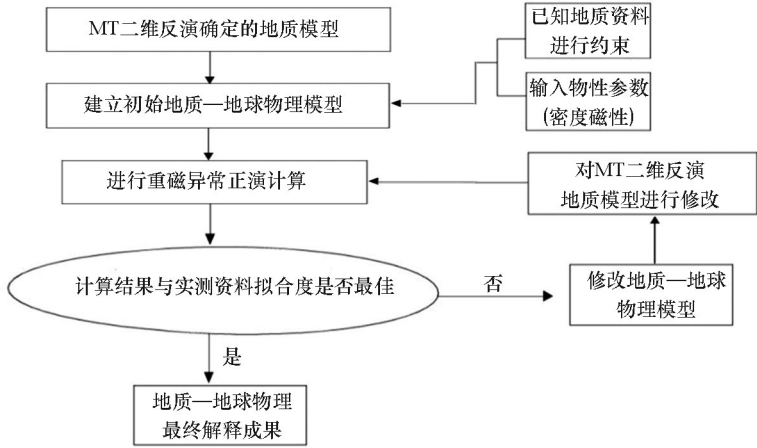


图 2 重、磁、电综合反演流程

Fig.2 Integrated inversion flow of gravity, magnetism and electricity

4 断裂构造解释

结合 1:25 万区调资料以及本次综合反演成果,该剖面的断裂构造分为区域断裂构造和次级断裂构造以及基底断裂构造^[17-18]。

区域断裂构造: F_{I-1} (招远—平度断裂):综合重、磁、电异常特征分析,该断裂为界岩构造,深部产状反映较为清晰,上下盘地质体视电阻率和密度都有较大差异;该断裂与其上盘栾家河断裂、丰仪店断裂等同属一条大的断裂带,视电阻率异常特征为一条大的向东缓倾的低阻带。 F_{I-2} (桃村断裂带)、 F_{I-3} (郭城断裂带):该剖面发育在中生代盆地中,其浅部视电阻率异常表现为明显的低阻异常带,在深部高阻背景中仍有断裂构造异常表现,推断其发育深度超 10 km。

次级断裂构造:本次圈定次级断裂构造 6 条,在图 4 中为红色细虚线表示,分别编号 F_{II-1} 、 F_{II-2} 、 F_{II-3} 、 F_{II-4} 、 F_{II-5} 、 F_{II-6} ,其中 F_{II-1} 为推断断裂, F_2 、 F_3 、 F_4 分别是招平断裂上盘一组与其倾向平行或有一定夹角的次级断裂, F_{II-2} 、 F_{II-3} 分别对应栾家河断裂和丰仪店断裂, F_{II-4} 为一条隐伏断裂,同时在玲珑岩体内部,发育一系列次级断裂构造,从本次 MT 电性结构图分析,这些断裂带发育深度和展布规模有限,属于岩体内部次级构造。

基底构造:本次在中生代盆地下伏基底,圈定 6 条具有明显断裂构造异常特征的构造带,在图 4 中用蓝色虚线表示,分别编号 F_{JD-1} ~ F_{JD-6} ,其中 F_{JD-5} 、 F_{JD-6} 为主断裂构造,推断是与深部热隆物质上升有关的区域性断裂构造,在 MT 视电阻率断面图中为明显的低阻异常带特征,且发育规模较大, F_{JD-1} ~ F_{JD-4} 为次级断裂,与盆缘附近的火山活动有关,以

F_{JD-2} 为代表,其低阻异常非常明显,与两侧地质体视电阻率差异明显。这些断裂构造是本次 MT 测量的新发现,尤其是 F_{JD-5} 断层在深部与招平断裂疑似相交的关系,这些新的发现为区内构造系统与深部金矿的研究提供了新的依据。

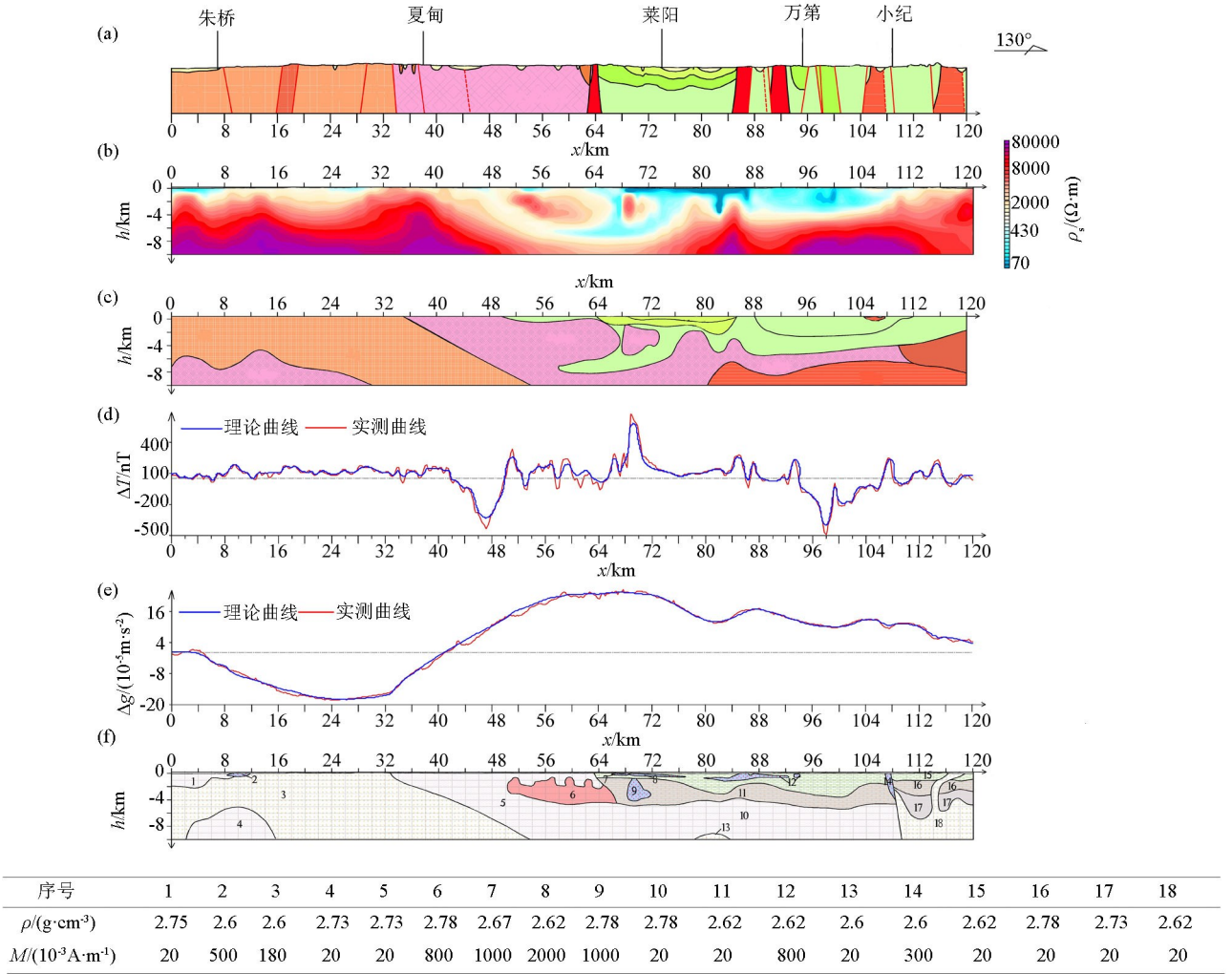
5 地层解释

通过本次实测 MT 及重磁联合反演成果(图 3),该剖面地质体主要分为 5 段:第四系覆盖区、玲

珑复式岩体核部、变质岩基底出露区、火山岩盆地和伟德山岩体高侵位区。

1) 第四系覆盖区:位于剖面 0~7.5 km,低磁性特征明显,但布格重力值较玲珑岩体核部升高,在 MT 电性结构图上反映该区由上之下分为 2000 m 以浅的低阻区和深部高阻区。根据区内地质资料和重、磁、电联合反演解释推断该低阻区为上覆变质岩体分布,深部高阻区对应为玲珑岩体分布。

2) 玲珑复式岩体核部:位于剖面 7.5~33.5 km,主要表现为高阻、低重、微磁特征,与东南部地质体



1—第四系;2—白垩系-古近系王氏群;3—白垩系青山群;4—下白垩界莱阳群;5—古元古界荆山群;6—新太古界栖霞序列;7—新元古界荣成序列;8—中生界玲珑序列;9—中生界伟德山序列;10—潜火山群; a—地质断面图; b—MT 二维电性结构; c—初始地质-地球物理模型; d—实测及反演拟合 ΔT 曲线; e—实测及反演拟合 Δg 曲线; f—重、磁联合反演推断块体及物性特征

1—Quaternary alluvium; 2—Cretaceous - Paleogene wang group; 3—Cretaceous qingshan group; 4—Early Cretaceous laiyang group; 5—jingshan group; 6—qixia sequence; 7—rongcheng sequence; 8—linglong sequence; 9—wade mountain sequence; 10—latent volcanoes; a—geologic section map; b—MT two-dimensional electrical structure diagram; c—initial geology-geophysical model; d—actual measurement and inversion fitting ΔT curve; e—actual measurement and inversion fitting Δg curve; f—gravity and magnetic joint inversion to infer the physical properties of blocks

图 3 重、磁、电联合反演推断结果

Fig.3 Inferred map of gravity, magnetism and electricity joint inversion

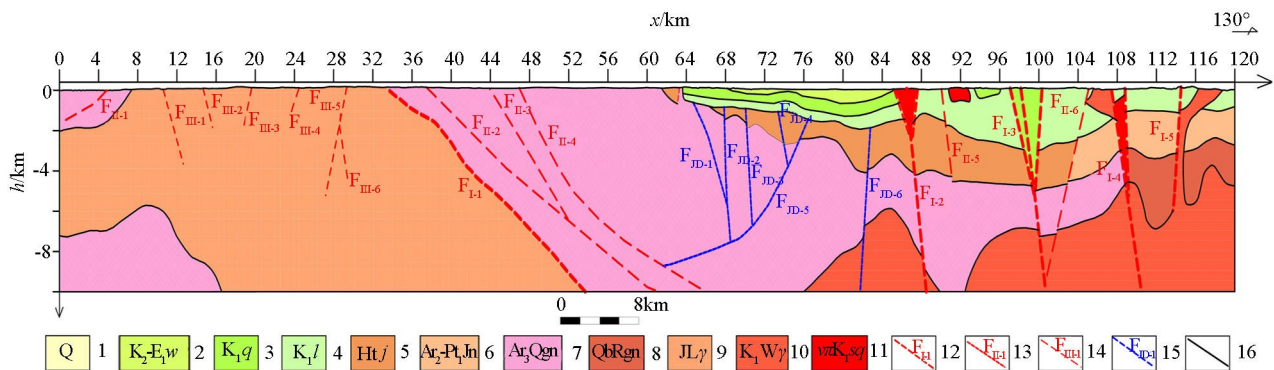


图 4 联合反演地质解释成果

Fig.4 Joint inversion geological interpretation results map

有明显的密度和视电阻率差异,根据重、磁异常反演拟合的玲珑岩体发育深度超过 10 km,根据重、磁、电联合反演成果显示在该区段玲珑岩体出露位置向 ES 向截止于大约 33.5 km 处,之后呈隐伏状态分布于东部变质基底下部,与上部地质体沿 F_1 (招远—平度断裂)中段呈断层接触。

3) 变质基底出露区:位于剖面 33.5~64 km,地表对应栖霞序列出露区,栖霞序列是一套古老的侵入岩体,经过地质演化和构造活动影响,反映出强烈变质变形的特点,岩体内部多有更早形成的基性、超基性岩,使其岩石密度测量结果高于中生代侵入岩体,该段布格重力异常呈向东南逐渐升高的特征,推断深部玲珑岩体呈断层接触侵入栖霞序列,在 MT 电性结构图中显示为中—高视电阻率异常特征,与深部玲珑岩体有明显的带状低阻异常分离,低阻异常宽大,推断与上盘栖霞序列遭受多期断层活动,致使该接触带尤其是上盘老的基底岩体视电阻率显著降低。

4) 火山岩盆地:位于剖面 64~106 km,地表对应中生代火山岩盆地分布区,主要表现为低阻、低密度、磁性变化大的特征,下伏荆山群、栖霞序列为中—高电阻、高密度、磁性不均匀特征,在该段布格重力表现为高异常、中局部低异常分布的特点。在 MT 电性结构图反映该区深部有高阻体发育,推断该高阻体为中生界侵入岩体的可能性较大,因此结合其深部异常形态解释该区中生代盆地最大厚度约 2 800 m。

5) 伟德山岩体高侵位区: 位于测线 106~120 km, 地表主要分布有白垩系青山群, 局部有伟德山岩体出露, 综合异常显示其重力值沿测线向剖面尽头逐渐降低, 视电阻率较西侧有明显抬升, 推测该段深部中生界侵入岩体向上侵位抬升、在断裂发育地段有潜火山岩集中上侵。

6 结论

研究区各时代地质体间有较为鲜明的密度、磁性和电性差异,在联合反演过程中,由物性资料建立的地质—地球物理模型的选取是处理的基础;在解释过程中,综合重、磁、电的地球物理场特征,结合地质规律,解决基岩断裂、地层、岩浆岩分布规律及深部特征等地质问题,提高定量解释的精度^[19]。

本次研究利用重、磁、电联合约束反演技术,重点解释了招平断裂带东(上)西(下)两盘新太古界栖霞片麻岩套与中生界玲珑岩体的构造接触界线的深部变化规律,较为清晰地刻画了招平断裂的深部空间展布特征;同时对胶莱盆地内白垩纪(火山)沉积地层及下伏前寒武纪变质基底的埋深、厚度、接触关系等空间几何要素进行研究,对胶莱盆地深部与金矿相关的隐伏中生代岩体进行了圈定。

胶东地区地质体分布多样,构造分布及地质体接触关系复杂,且部分地质体间具有相近的物性特征,利用重、磁、电单方法往往难以取得理想的解释效果。例如 MT 法难以区分同为低阻的白垩系盆地

与荆山群变质基底,而重、磁法难以将同为低密度、低磁性的中生界岩体与栖霞片麻岩套进行划分,本次利用重、磁、电联合约束反演技术,既减少了重磁联合反演的多解性问题,同时弥补了 MT 法对部分相似电性特征地质体的分层难题,使本次深部地球物理探测的解释成果更贴近真实地质情况。

通过该剖面综合地球物理探测研究,解释了 10 km 以浅胶东金矿集区热隆—伸展构造样式的深部空间特征,表明在此深度利用重、磁、电的组合方法进行深部地质结构和构造的探测及研究是适用的,深部探测效果符合预期,达到了良好的解释效果,为今后深部金矿找矿预测以及相关研究工作提供目标和依据。

参考文献 (References):

- [1] 曹春国,韩玉珍,关荣斌,等.胶西北矿集区深部金矿应用地球物理找矿技术实践[M].北京:地质出版社,2016.
Cao C G, Han Y Z, Guan R B, et al. Application of geophysical prospecting technology to deep gold deposits in jiaobei ore concentration area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [2] 陈洁,温宁,陈邦彦.重磁电震联合反演研究进展与展望[J].地球物理学进展,2007,22(5):1427-38.
Chen J, Wen N, Chen B Y. Joint inversion of gravity-magnetic-electrical-seismic combination survey: progress and prospect [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1427-1438.
- [3] 夏吉庄,李云平,阎汉杰,等.重磁电震联合反演技术及应用[J].油气地质与采收率,2003,10(5):33-35.
Xia J Z, Li Y P, Yan H J, et al. Integrate gravity-magnetic-electric-seismic inversion and its application [J]. PGRE, 2003, 10(5): 33-35.
- [4] 宋明春,崔书学,伊丕厚,等.胶西北金矿集中区深部大型:超大型金矿找矿与成矿模式[M].北京:地质出版社,2010.
Song M C, Cui S X, Yin P H, et al. Deep large gold deposits in northwest Jiaodong area: Prospecting and metallogenic model of super large gold deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [5] 许谱林,吕古贤,武际春,等.胶东金矿田地质勘查研究[J].矿物学报,2013(s2):66-67.
Xu P L, Lyu G X, Wu J C, et al. Geological exploration of jiaodong gold deposit [J]. Journal of Mineralogy, 2013, (s2): 66-67.
- [6] 山东省物化探勘查院.山东省胶东地区区域岩石物性调查成果报告[R].山东省物化探勘查院,1992.
Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute. Results of regional petrophysical property survey in Jiaodong area, Shandong Province [R]. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, 1992.
- [7] 万国普,韩玉珍,丁孟三,等.胶东地区区域岩石物性参数的地质应用[J].山东国土资源,2006,22(8):36-39.
Wan G P, Han Y Z, Ding M S, et al. Geological application of regional petrophysical parameters in Jiaodong area [J]. Shandong Land and Resources, 2006, 22(8): 36-39.
- [8] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
Zeng H L. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [9] 管志宁.地磁场与磁力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
Guan Z N. Geomagnetic field and magnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [10] 丁文祥,袁峰,李晓晖,等.基于重磁联合反演的宁芜盆地钟姑矿田深部地质结构解析及成矿预测[J].地质学报,2018,92(11):2301-2317.
Ding W X, Yuan F, Li X H, et al. Deep geological structure analysis and metallogenic prediction of Zhonggu ore field in the South section of Ningwu Basin based on gravity and magnetic joint inversion[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(11): 2301-2317.
- [11] 柳建新,童孝忠,郭荣文,等.大地电磁测深法勘探—资料处理、反演与解释[M].北京:科学出版社,2012.
Liu J X, Tong X Z, Guo R W, et al. Magnetotelluric sounding exploration—Data processing, inversion and interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [12] 陶娟,雷宛,陈思宇,等.大地电磁测深成果与地质剖面联合解释及其效果[J].物探化探计算技术,2013,35(6):651-657.
Tao J, Lei W, Chen S Y, et al. Combining interpretation on the result of magnetotelluric sounding with the geology and the effect [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 35(6): 651-657.
- [13] 刘建利,李西周,张泉.重、磁、电联合反演在银额盆地定量解释中的应用[J].物探与化探,2013,37(5):853-858.
Liu J L, Li X Z, Zhang Q. The application of gravity-magnetic-magnetotelluric joint inversion to the quantitative interpretation of Yin'E Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 853-858.
- [14] 马为,李世斌,徐新学,等.重磁电联合反演方法在天津基岩构造研究中的应用[J].地质调查与研究,2014,37(3):212-216.
Ma W, Li S B, Xu X X, et al. Application of gravity-magnetic-resistivity joint inversion on the research of the bedrock geological structure in Tianjin area [J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(3): 212-216.
- [15] 区小毅,黎海龙,杨富强,等.重磁电综合物探技术在南方页岩气地质调查中的应用研究——以桂中坳陷鹿寨地区为例[J].地球物理学进展,2019,34(3):1081-1088.
Ou X Y, Li H L, Yang F Q, et al. Application of integrated gravitational, magnetic and electrical geophysical methods to the shale-gas geological exploration in southern: a case study of Luzhai, Guizhong depression [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1081-1088.
- [16] 刘文玉,李桐林,薛林福,等.辽吉古裂谷三维地质结构重磁电综合解释[J].地球物理学进展,2015,30(2):516-523.
Liu W Y, Li T L, Xue L F, et al. GME integrated interpretation of 3D geological structure of Liao-Ji ancient rift based on geophysical data [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 516-523.
- [17] 王沛成,刘建文,宋志勇.中国人民共和国区域地质调查报告 1:25 万(烟台幅)[R].山东省地质调查院,2003.

Wang P C, Liu J W, Song Z Y. Regional geological survey report of the People's Republic of China 1:250 000 (Yantai) [R]. Shandong Institute of Geological Survey, 2003.

[18] 刘瑞国,位才波,鄢毅民. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:25 万(青岛幅)[R]. 山东省地质调查院,2004.

Liu R G, Wei C B, Yan Y M. Regional geological survey report of the People's Republic of China 1:250 000 (Qingdao) [R]. Shan-

dong Institute of Geological Survey, 2004.

[19] 何展翔,王永涛,刘云祥,等. 综合物探技术新进展及应用[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(1):108-112.

He Z X, Wang Y T, Liu Y X, et al. New progress and application of integrative geophysical survey techniques [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(1): 108-112.

Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures:
A case study of Jiaodong gold ore concentration area

CHEN Da-Lei^{1,2}, WANG Run-Sheng^{1,2}, HE Chun-Yan^{1,2}, WANG Xun^{1,2}, YIN Zhao-Kai³, YU Jia-Bin^{1,2}
(1.Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration Institute,Jinan 250013,China; 2.Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center,Jinan 250013,China; 3.No. 6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Zhaoyuan 265400,China)

Abstract: Jiaodong area is one of the major gold producing areas in China, and the deep prospecting in this area is to seek deep breakthroughs and blind spots at present. With the gold concentration area in Jincheng Town in Laizhou City and Ershilidian Town in Haiyang City as an example and based on the prediction and assessment theory and method of deep gold resources, this study summarizes the deep spatial characteristics and relationships of the Archeozoic-Mesozoic intrusive rocks, Precambrian metamorphic basement, and the strata in Jiaolai Basin in the area and the deep morphology and characteristics of major ore-controlling structures in the area. To this end, section measurement was carried out using the integrated geophysical exploration of high-precision gravity survey, high-precision magnetic survey, and magnetotelluric sounding. Meanwhile, the obtained gravity, magnetic, and resistivity data were comprehensively researched and analyzed in combination with previous results. This study will provide a basis for the late prospecting prediction of deep gold deposits and related researches of the area.

Key words: gravity and magnetic exploration; magnetotelluric sounding; Mesozoic intrusive rocks; Precambrian metamorphic basement; Jiaolai Basin

(本文编辑:王萌)